

= 단신 =

## 즉발감마선 계측시스템의 반사체를 이용한 열중성자 효율증대 연구

박용준\* · 송병철 · 지광용

한국원자력연구소 원자력화학연구부  
(2003. 8. 26. 접수, 2003. 9. 19 승인)

### Study on Thermal Neutron Efficiency for Neutron Induced Prompt Gamma-ray Spectrometer Using Various Reflectors

Y. J. Park\*, B. C. Song and K. Y. Jee

Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 305-353, Korea

(Received Aug. 26, 2003, Accepted Sep. 19, 2003)

**Abstract** : Neutron induced prompt gamma-ray spectroscopy (NIPS) system equipped with a  $^{252}\text{Cf}$  neutron source and a n-type coaxial HPGe detector was installed for the quantitative analysis of aqueous samples in KAERI, Korea. Since the thermal neutron flux for the  $^{252}\text{Cf}$  neutron source is relatively low compared to that for the reactor, the use of a thermal neutron reflector in the NIPS system may lead to improved results. The enhancement by using various reflectors was carried out by comparing the Cl peak with or without a cadmium plate between sample and the  $^{252}\text{Cf}$  source. The use of pyrolytic graphite as a reflector provided a good result.

**Key words** : thermal neutron, reflector, HPGe detector

## 1. 서 론

즉발감마선 중성자 방사화법 (NIPS, Neutron Induced Prompt  $\gamma$ -ray Spectroscopy)은 원소의 핵과 열중성자와의 핵반응에 의해 발생하는 즉발감마선을 계측함으로써 시료 내 성분원소를 비파괴적으로 분석하는 방법이다. 이 분석방법은 X-선 형광분석법 (XRF) 또는 중성자방사화 분석법 (NAA)등의 기존의 비파괴 분석법으로는 분석하기 힘든 수소, 질소, 인, 황, 또는 규소와 같은 원소들의 분석에 매우 유리한 장점을 지니고 있다.

즉발감마선 중성자 방사화법의 중성자 선원으로 연구용 원자료를 이용하거나  $^{252}\text{Cf}$ 와 같은 방사성 동위원소 선원을 사용할 수 있다. 연구용 원자로는  $1.0 \times 10^7 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  이상의 높은 열중성자 속을 가지고 있으나 모든 시료를 원자로로 가지고 와야 하고, 시료의 크기 등에 제한이 있다는 단점이 있다. 그러나 방사성동위원소를 사용하면, 시스템의 이동성이 용이해 지며 시료의 부피가 큰 경우에도 분석이 가능하지만 상대적으로 열중성자속이 비교적 낮다는 단점을 갖고 있다.

대부분의 연구용 원자로는 중성자 반사체를 사용하여 열효율을 증대시키고 에너지 손실을 줄인다. 중성자 반사체로 사용되는 물질은 일반적으로 낮은 중성자 흡수단면적을 가지며, 낮은 질량수의 원소의 물질이

★ Corresponding author  
Phone : +82+(0)42-868-8153 Fax : +82+(0)42-868-8148  
E-mail : jparky@kaeri.re.kr

많이 사용된다. 따라서 베릴륨이나 탄소(carbide 또는 graphite)과 같은 반사체에 대한 많은 연구가 이루어졌으며, 최근 들어서는 LiF 또는 규소와 같은 결정구조를 가지고 있는 물질에 대한 연구도 많이 진행되고 있다.<sup>1,3</sup> 미국 알곤 연구소에서는 intense pulsed neutron source (IPNS)의 효율을 높이기 위해 안쪽 반사체로 graphite를 사용하였고, 바깥쪽 반사체로는 베릴륨을 사용하였다. 베릴륨이 graphite보다 반사체 효율이 좋은 것으로 알려져 있지만, 베릴륨의 가격이 워낙 비싸기 때문에 교체가 요구되는 안쪽 반사체로 graphite를 이용하였다.<sup>4</sup>

본 연구에서는 <sup>252</sup>Cf를 이용하는 NIPS 측정시스템에 유리, carbon 및 pyrographite와 같은 중성자 반사체를 이용하여 열중성자 효율을 높이려고 하였다. 카드뮴 판을 이용하여 시료로 방출되는 열중성자를 차단하고 CI의 즉발감마선을 측정하여 시료 내에서 열화되는 열중성자 효율을 비교 분석하였다.

## 2. 실험

본 연구에서는 열중성자 효율을 측정하기 위해 1 M Cl용액을 이용하여 중성자 조사에 의한 핵반응 <sup>35</sup>Cl(n, γ)<sup>36</sup>Cl로부터 방출되는 즉발감마선을 측정하였다. 조사 선원으로는 2.638년 반감기의 <sup>252</sup>Cf(5.4 mCi, 2.4 x 10<sup>7</sup> n · s<sup>-1</sup>, Frontier Technology Co.) 중성자 선원을 이용하였다. 중성자 선원의 보관은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 지름 900 mm의 원통형 폴리에틸렌을 이용하였으며 보관함과 테이블 위쪽의 시료위치까지 공기실린더를 이용하여 선원이 이동할 수 있도록 제작하였다. 시료용기가 위치하는 측정실은 200 mm 두께의 폴리에틸렌과 50 mm 두께의 납으로 차폐되어 있으며 그 사이에는 25.3 wt% 보론을 함유하는 고무판을 이용하여 열중성자를 차폐하였다. 25 mm 두께의 납을 이용한 실린더형의 검출기 차폐체 안쪽에는 경 X-선을 차단하기 위하여 Cu lining을 하였다. 감마선 검출기로는 HPGe(GMX, 25% 상대효율, EG&G ORTEC) 이동형 검출기를 이용하였으며, 동시계수 장치를 이용한 바탕값 감쇄를 위하여 두 개의 검출기를 사용할 경우 검출기가 서로 마주 보지 않도록 차폐체를 이용하여 90도 방향으로 위치시켰다. HPGe 검출기 주위는 50 mm 두께의 납벽돌로 추가로 차폐를 하고 방향은 시료용기 상단부분으로 향하게 하여 중성자선원을 직접 바라보

지 않도록 위치하였다. 또한 검출기 전면에는 Li이 함유된 폴리에틸렌 차폐체를 부착하여 중성자에 의한 검출기의 충격을 최소화할 수 있도록 구성하였다.

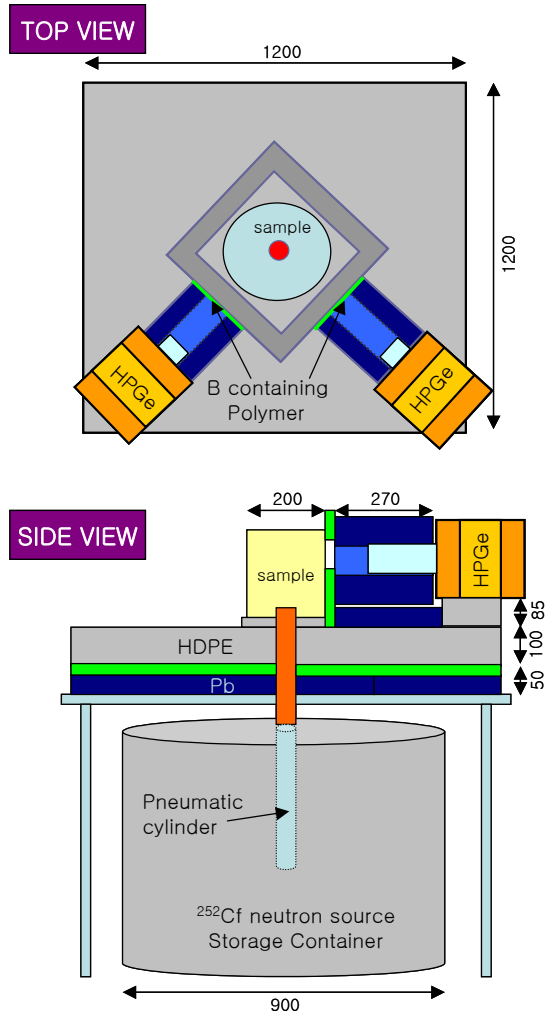


Fig. 1. Schematic drawing of NIPS system setup.

측정 시스템은 ADCAM100 (EG&G ORTEC)과 HPGe (GMX-25190-P, EG&G ORTEC) 검출기를 사용하였으며 소프트웨어는 MAESTRO II를 이용하여 5000초 동안 측정하였다.

열중성자 효율 측정을 위한 방법으로 1 mm 두께의 카드뮴 판을 시료용기 바닥 면에 부착하고 열중성자를 차폐하였으며, 카드뮴 판이 없을 때와 비교하여 순수한 속중성자에 의해 열화되는 정도를 측정하였다. 시

료는 1M KCl 표준용액을 제조하여 400 mL 폴리에틸렌 시료용기를 이용하였으며, 중성자 반사체는 유리, carbon 또는 pyrographite의 재질의 100 mm(i.d.) x 120 mm(L)의 비이커 형태의 반사체를 사용하여 시료용기를 위쪽에서 덮고 열중성자 효율을 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

휴대용 또는 실시간 분석이 가능한 NIPS 측정시스템을 CI를 포함하는 수용액의 정량분석에 응용을 하였다.  $^{252}\text{Cf}$ 를 이용한 NIPS 측정시스템은 이미 발표된 바와 같이 한국원자력연구소 원자력화학연구부에서 개발을 하였다.<sup>5</sup> 이 장치는 두 개의 HPGe 검출기와 동시계수장치를 이용하여 감마선 바탕값을 최소로 하였으며, CI 또는 Ca 등의 원소에 대한 정량분석을 위해 순수 게르마늄 검출기의 계측효율을  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  및 중성자 조사에 의하여 방출되는  $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$  즉발 감마선을 이용하여 80 keV에서 8 MeV 까지 넓은 영역에 대하여 계측효율을 구하였다.<sup>6</sup>

$^{252}\text{Cf}$  선원과 같은 RI 중성자 선원에서 방출되는 열중성자속은 원자로에 비교하여 매우 작기 때문에 중성자 반사체를 이용하여 시료를 덮어서 중성자 효율을 높이고자 하였다.  $^{252}\text{Cf}$  중성자 선원은 대부분 속중성자를 방출하며 열중성자속은 매우 낮다. 그러나, 본 연구에서는 수용액 시료를 사용하므로 시료의 특성상 속중성자가 수용액 내에서 열화되어 전체 평균 열중성자속은 선원 자체가 방출하는 비율보다 높을 것으로 판단된다.

$^{252}\text{Cf}$ 를 이용한 NIPS 측정시스템은 Fig. 1에 보이듯이 중성자 선원이 시료용기 아래쪽에 위치한다. 만약 시료용기와 중성자선원사이에 열중성자 흡수단면적 (2450 barn)이 매우 높은 카드뮴 판으로 막는다면 중

성자 선원에서 발생하는 열중성자는 모두 차단하고 속중성자만 통과할 것이다. 본 연구에서는 1 mm 두께의 카드뮴 판을 사용하였으며, 이 때 열중성자 차폐율 ( $I/I_0$ )은  $1.18 \times 10^{-5}$ 으로 선원으로부터 방출되는 대부분의 열중성자는 차폐할 것으로 예상된다.

$^{252}\text{Cf}$  선원으로부터 방출되는 열중성자 분율 및 수용액에 의해 열화되는 정도를 알아보기 위하여 고체 KCl 시료와 1.0 M KCl 표준용액 400 mL를 이용하여 CI의 즉발감마선을 측정하였다. CI는 33.1 barn의 반응 단면적을 가지며, 동위원소 존재비는  $^{35}\text{Cl}$ 이 75.78%이고  $^{37}\text{Cl}$ 은 24.22%이다. CI의 즉발감마선 스펙트럼은 517, 788.4, 1164.8, 1951.14, 6110.88 그리고 7413.9 keV의 에너지를 갖는 즉발감마선을 보이며, 본 연구에서는 비교적 높은 감마선 세기를 갖는 1164.8 keV를 선택하였다.

고체 KCl 시료를 카드뮴 차폐체 없이 측정한 결과  $11.37 \pm 0.20$  cps를 보였고 카드뮴 차폐체 존재 하에서는  $1.64 \pm 0.16$  cps로 차폐체 없이 측정했을 때와 비교하여 약 14.4%의 감마선 세기를 나타내었다. 여기에서 나타난 14.4%는 바로 시료 주위에서의 순수한 속중성자의 열화로 발생한 열중성자의 중성자 capture 반응에 의한 즉발감마선 발생율이라고 볼 수 있으므로 본문에서는 시료자체의 바탕 열화율이라고 나타내었다. 따라서,  $^{252}\text{Cf}$  선원으로부터 발생하는 열중성자가 카드뮴에 의해 완전히 흡수되었다고 가정할 때, 속중성자의 고체시료 내에서는 열화 때문인 것으로 보기는 어렵고, 주변 물질에 의한 열화로부터 발생하는 열중성자 바탕값으로 사료된다.

본 연구에서 사용된 NIPS 측정시스템의 기하학적 구조에서 1.0 M KCl 표준용액 400 ml를 이용하여 몇가지 반사체에 의한 열중성자 효율을 동일한 조건에서 측정한 결과를 Table 1에 나타내었다. KCl 수용액 시료를

Table 1. Enhancement of Thermal neutron efficiency using various reflectors

	Without Cd plate		With Cd plate		Total % moderation in sample	Net % moderation in sample
	Net Area	Net count rate	Net Area	Net count rate		
no reflector	21807±1286	4.36±0.26	5750±1350	1.15±0.27	26.4	12.0
glass	16416±1185	3.28±0.24	5189±1324	1.04±0.26	31.7	17.3
carbon	22080±1223	4.42±0.24	7104±1294	1.42±0.26	32.1	17.7
pyrographite	23535±1287	4.71±0.26	6587±1354	1.63±0.27	34.6	20.2

측정한 결과  $4.36 \pm 0.26$  cps이었고 시료 밑면에 카드뮴 판으로 차폐를 한 경우는  $1.15 \pm 0.27$  cps로 고체시료의 경우보다 상당히 높은 감마선 계수율을 얻었다. 이는 고체시료 자체의 바탕 열화율인 14.4% 보다 훨씬 높은 26.4%로 동일 비율을 바탕으로 감안하였을 때, 12.0% 정도가 선원에서 방출되는 속중성자가 수용액 내에서 열화되었기 때문인 것으로 판단된다.

중성자 반사체로 유리 비이커를 이용하여 측정하였을 때  $3.28 \pm 0.24$  cps, 그리고 카드뮴 판으로 차폐를 하였을 때  $1.04 \pm 0.26$  cps 계수율을 얻었다. 카드뮴 판에 의하여 중성자 선원 자체에서 방출되는 모든 열중성자를 모두 차폐한 상태에서 수용액 내에서 속중성자의 열화로 변환된 열중성자 열화율이 중성자 반사체가 없는 경우는 12.0%이었던 것과 비교하여, 유리 비이커를 이용하였을 때는 17.3%로 증가한 것을 알 수 있으며, carbon을 반사체로 사용하였을 때는 17.7%로 상승하였으며, pyrographite를 사용하였을 때는 20.2%로 증가됨을 알 수 있었다.

본 연구에서 다양한 반사체를 사용하였을 때 얻은 즉발감마선의 계측율 자체는 carbon과 pyrographite의 경우 증가하지만, 유리의 경우는 약간 감소함을 알 수 있다. 이것은 유리가 반사체의 효과도 약간 있지만 발생하는 즉발감마선의 차폐효과도 있기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

$^{252}\text{Cf}$ 를 이용하는 NIPS 측정시스템에 유리, carbon 및 pyrographite등의 중성자 반사체를 이용하여 열중성자 효율을 높이고자 하였다. 카드뮴 판을 이용하여 시료로 방출되는 열중성자를 차단하고 CI의 즉발감마선을 측정하여 시료 내에서 열화되는 열중성자 효율을 비교 분석하였다. Pyrographite를 사용하였을 때 유리에 비해 훨씬 열중성자 효율이 좋은 것으로 나타났다. 차후 열중성자 효율을 높이기 위해 pyrographite에 베릴륨 코팅 처리를 하여 효율의 향상 여부를 측정할 예정이다. 본 연구에서 개발한 NIPS 측정시스템은 반사체를 사용함으로써 열중성자 효율을 높힐 수 있으며, 기존의 연구용 원자로를 이용하는 PGAA방법과 비교하여  $^{252}\text{Cf}$  중성자 선원의 이동성 장점을 이용하여 시멘트 및 석탄 등의 산업현장에서 실시간 분석장치로 응용할 수 있으며, 또한 최근의 미국의 9/11 테러사건 이후,

국제적인 문제로 주목받는 폭발물의 탐지를 위해 공항 또는 항구의 승객 수화물 검색용으로 응용할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. M. Iqbal, M. Abdullah and S. Pervez, *Annals of Nuclear Energy*, **29**, 1609-1624 (2002).
2. M. L. Crow, *Physica B*, **241-243**, 110-112 (1998).
3. Y. Gohar and D. L. Smith, *Journal of Nuclear Materials*, **283-287**, 1370-1374 (2000).
4. I. Baek, J. M. Carpenter and E. Iverson, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, **490**, 522-526 (2002).
5. Y. J. Park, B. C. Song, and K. Y. Jee, *Journal of the Analytical Science & Technology*, **16(1)**, 12-24 (2003).
6. Y. J. Park, B. C. Song and K. Y. Jee, *Journal of the Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, in print (2003).